Aus dem Sonderforschungsbereich 92
"Biologie der Mundhöhle"
Sprecher: Prof. Dr. G. Siebert
und
aus der Klinik und Poliklinik für
Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
(Direktor: Prof. Dr. R. Naujoks)

ERPROBUNG UND ANWENDUNG EINES VERFAHRENS ZUR UNTERSUCHUNG DER FEINGESTALT VON ZAHNOBERFLÄCHEN

Inaugural-Dissertation

verfaßt und der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Volker Kulzer

aus Swinemünde

Würzburg, den 15. April 1980

Aus dem Sonderforschungsbereich 92
"Biologie der Mundhöhle"
Sprecher: Prof. Dr. G. Siebert
und
aus der Klinik und Poliklinik für
Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
(Direktor: Prof. Dr. R. Naujoks)

ERPROBUNG UND ANWENDUNG EINES VERFAHRENS ZUR UNTERSUCHUNG DER FEINGESTALT VON ZAHNOBERFLÄCHEN

Inaugural-Dissertation

verfaßt und der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Volker Kulzer
aus Swinemünde

Würzburg, den 15. April 1980

Referent: Prof. Dr. F. Gehring

Korreferent: Prof. Dr. R. Naujoks

Dekan: Prof. Dr. K. H. Wulf

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Juli 1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität Würzburg

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
I.	Einleitung und Problemstellung	1
II.	Literaturübersicht	3
III.	Material und Meßverfahren	8
IV.	Ergebnisse	12
V.	Diskussion	26
VI.	Zusammenfassung	30
VII.	Literaturverzeichnis	31

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543521_0082

I. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Genaue Kenntnisse über die topographische Beschaffenheit von Hartgewebs-, Metall- und Kunststoffoberflächen sind in der Zahnmedizin bei zahlreichen Fragestellungen von großer Bedeutung. Bei der Anlagerung von Bakterien und bei der Plaquebildung auf der Zahnoberfläche spielen die Oberflächenrauhigkeit und die Oberflächenwelligkeit eine wichtige Rolle. Bereits das Anfangsstadium des Kariesprozesses ist durch chemische Lösungsprozesse auf der Zahnoberfläche und damit durch eine Veränderung der Oberflächentopographie als lokale Entkalkung im Schmelzmantel gekennzeichnet.

Bei allen mechanischen Bearbeitungen der Zahnhartsubstanz im Zusammenhang mit konservierenden Maßnahmen zur Erhaltung des Zahnes ist die Rauhigkeit und Oberflächenbeschaffenheit der entstehenden Oberfläche von großer Bedeutung für die Haftfestigkeit eines Aufbaues oder einer Füllung. Ähnliches gilt für die Haftfestigkeit von Versiegelungslacken. Die Oberflächenmorphologie von Zahnfüllungsübergängen ist häufig für die Dauerhaftigkeit der Füllung und für das Entstehen eines sekundär-kariösen Prozesses entscheidend.

Es wurde deshalb bereits häufig versucht, in Ergänzung zu lichtmikroskopischen und rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen quantitative Messungen der Oberflächenbeschaffenheit an Zähnen und Füllungen durchzuführen. Die bisher angewendeten mechano-elektrischen Meßmethoden erlauben aber alle nur Messungen

---

Die Arbeit wurde mit Sondermitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 92 "Biologie der Mundhöhle" gefördert.

der Oberflächenfeingestalt entlang einer Linie auf der zu untersuchenden Oberfläche (LÄSSIG und LEIDIG 1976, FUHR und ROMETH 1976, MEIER 1977). Quantitative Untersuchungen über einen flächenhaften Bereich und die dreidimensionale Registrierung der Oberflächenfeingestalt waren jedoch bisher nicht möglich.
Eine von GABRIEL und KLINGER (1974, 1976, 1977) entwickelte Meßanordnung erlaubt demgegenüber durch mechano-elektrische Abtastung von Zahn- und Zahnschliffoberflächen die dreidimensionale Registrierung der Oberflächenfeingestalt von natürlichen und artifiziell veränderten beliebig großen Schmelzarealen, soweit sie nicht eine allzu große Oberflächenkrümmung aufweisen. Somit wurde es auch möglich, in vitro Oberflächenveränderungen nach Ätzvorgängen zu untersuchen, die dem Säureangriff beim primären Kariesprozeß weitgehend entsprechen.
Eine solche Säureätzung, die in der Kariesforschung schon lange eine Routinemethode zur morphologischen Untersuchung der Schmelzlöslichkeit darstellt, ist geeignet, kariestypische Demineralisationseffekte auf Zahn- und Zahnschliffoberflächen aufzeigen zu können.

In der vorliegenden Arbeit sollte dieses Untersuchungsverfahren zur Erfassung von Oberflächenveränderungen, die durch Ätzung mit gepufferter Phosphorsäure auf der natürlichen Oberfläche eines extrahierten menschlichen Schneidezahnes in vitro erzeugt wurden, angewendet werden. Dabei sollte versucht werden, die Strukturen der ungeätzten natürlichen Zahnoberfläche (z.B. der Perikymatien) den entstehenden Ätzstrukturen zuzuordnen. Außerdem sollte geklärt werden, inwieweit der derzeitige Entwicklungsstand des Verfahrens geeignet ist, eventuelle Unterschiede des Ätzabtrages und des Ätzmusters in verschiedenen Bereichen der angeätzten Oberfläche nachzuweisen. Gepufferte Phosphorsäure als Ätzmittel wurde deswegen gewählt, weil sie als Konditionierungsmittel zur Anätzung von Zahnoberflächen, die in vivo mit einem kariesschützenden Versiegelungslack versehen werden sollen, benutzt wird.

II. LITERATURÜBERSICHT

Die auffälligsten Oberflächenstrukturen einer natürlichen Zahnoberfläche sind zweifellos wellenförmige, horizontal verlaufende Ringe auf der Zahnoberfläche, die schon RETZIUS 1837 sehr genau beschrieb. Bei PREISWERK (1895) werden sie Perikymatien genannt. Sie verlaufen am Zahnhals dichter als an der Schneidekante und werden als Endigungen der Retziusstreifen an der Oberfläche angesehen.

PICKERILL (1913) untersuchte lichtmikroskopisch die Oberflächenstruktur von Zähnen und wies in diesem Zusammenhang bei den horizontalen Linien auf eine Schichtung und eine dachziegelartige Anordnung dieser "Imbrikationslinien" hin.

1940 stellte WOLF mit der "Adhaesionsreliefmethode", der Replicamethode, ein neues Darstellungsverfahren vor. Die Zahnoberfläche konnte mit dieser Methode ohne Beschädigung abgeformt werden und in feinste Einzelheiten bis an die Grenze des Auflösungsvermögens des Lichtmikroskopes dargestellt werden.

WOLF beobachtete das Prismenrelief und deutete die Welligkeit der Perkymatien als unregelmäßige "halbmondförmige verschmolzene Halbscheiben".

EISENBERG untersuchte mit dem Ultramikroskop 1938 die Schmelzoberfläche und stellte fest, daß Perikymatien meist nur cervikal festzustellen seien, und daß sie bei älteren Zähnen im mittleren, bzw. oberen Drittel in der Regel durch Abrasion verschwunden seien. Den Abstand zwischen diesen "crest of ripples" gibt er mit 30 - 50 µm an, die Tiefe variiert zwischen 5-10 µm. SCOTT (1952) gibt an, daß am Zahnhals 30 Perikymatien pro mm, an der Schneidekante aber nur 10 pro 1 mm auftreten.

Auch GUSTAFSON spricht bei dieser Welligkeit auf der Zahnoberfläche von Perikymatien. Im Gegensatz zu MEIER (1951) und anderen Autoren erklärt er aber die Entstehung dieser Mulden als Ab-

knickungen der Prismenendigungen an der Zahnoberfläche.
KRÖNCKE (1966) bestätigt bei seinen Untersuchungen von Anzahl, Entwicklung, Abstand und Tiefe der Perikymatien diese These von GUSTAFSON. Für die Retziusstreifen wie auch für die Perikymatien hält er Strukturabknickungen im Verlauf der Schmelzprismen für verantwortlich.
SCOTT, KAPLAN und WYCKOFF (1949) stellten bei Untersuchungen gerade durchgebrochener und nicht durchgebrochener Zähne fest, daß zunächst die Zahnoberfläche ausgeprägt mit Prismenendigungen und Perikymatien bedeckt ist. Nach dem Durchbruch erfolgte dann aber ein Verflachen der Perikymatien, wobei noch Unterschiede bei Molaren, Prämolaren und Schneidezähnen festzustellen sind.
HEUSER (1961) beobachtete, daß die Perikymatien an der Labialfläche wellenförmig ausgebildet sind, während sie approximal dagegen mehr bogenförmig-konvex aussehen. Er findet bei seinen Untersuchungen zusammen mit PANTKE (1961) geradlinig parallel verlaufende Perikymatien. Sie bestätigen SCOTT und WYCKHOFF (1949), die in verschiedenen Arealen ein mehr oder weniger häufiges Vorkommen der Perikymatien finden. Die mit Hilfe der Replica-Technik vor allem von PANTKE und HEUSER gewonnenen Erkenntnisse über Perikymatien faßte BURKHARDT (1964) in einer Dissertation zusammen.
Bei in vitro Versuchen hatten HEUSER und PANTKE die Anätzung von Zahnschliffoberflächen durch Säuren unter verschiedenen Bedingungen untersucht. Dabei wurde die unterschiedlicheLöslichkeit in verschiedenen Oberflächenbereichen durch licht- und rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen lediglich qualitativ festgestellt. Weitere lichtmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Erfassung natürlicher und bearbeiteter Zahn- und Zahnschliffoberflächen zeigen ein anschauliches Bild der Oberflächentopographie (HORN 1967, 1967, 1969, VAHL und WOSIEWITZ 1976). Auch hier zeigt es sich, daß bei all diesen Verfahren zwar Abstände verschiedener Orte auf der Oberfläche sehr leicht auszumessen sind, jedoch quantitative Höhenmessungen auf

zerklüfteten Präparatoberflächen sehr schwer durchzuführen sind. Geringe Höhenunterschiede lassen sich, wie HELMCKE und RIENITZ (1959) schon zeigten, durch verschiedene Auflicht-Interferenzmikroskopiemethoden quantitativ erfassen. Wie HELMCKE (1959 und 1968) zeigte, können mit rasterelektronen-mikroskopischen Aufnahmen hochauflösende Bestimmungen der Höhenunterschiede auf sehr kleinen Flächenarealen erfaßt werden. Für quantitative Messungen über größere Flächen zur Erfassung von Veränderungen der Oberflächentopographie im Bereich von Makro- und Halbmakrostrukturen ist das elektronenmikroskopische Verfahren nicht geeignet.

POOLE und JOHNSON (1967) beschrieben, daß sich das bei der Zerstörung durch Karies ergebende Bild der Oberfläche dem der Säureätzung sehr ähnelt, besonders wenn man EDTA verwendet. Sie können jedoch nur fortgeschrittene Stadien der Säureätzung erfassen, die dem fortgeschrittenen Stadium kariöser Prozesse entspreche. Das Anfangsstadium solcher Prozesse konnten sie nicht erfassen.

LENZ und NEWESELY beschäftigten sich 1965 mit der Säureätzung von Oberflächen. Sie weisen darauf hin, daß Prismen- und Zwischenprismenbereiche geringe Unterschiede in ihrem Verhalten gegenüber Ätzung aufzeigen. Bei diesen Säureätzungen fanden sie, daß der verbleibende Schmelz eine sehr poröse Struktur aufwies.

Auch BARNES (1977) beschreibt, wie SILVERSTONE, GWINNETT und BOUNOCORE (1971) die stark poröse Struktur der Oberfläche nach Anätzen, wobei die Annahme vom Vorhandensein einer organischen Matrix an der Oberfläche des Schmelzes von BARNES nicht bestätigt wird.

Eine zunehmende Bedeutung bekommt die Oberflächenstruktur artifiziell geätzter Oberflächen im Zusammenhang mit der Verbesserung der Zahnversiegelungsmethoden. Besonders SILVERSTONE (1967, 1970, 1971, 1975) hat sich in zahlreichen Arbeiten mit der Frage beschäftigt, inwieweit die Ätzwirkung phänomenologisch verfolgbar ist. Er zeigt bei Untersuchungen der Versiegelungstechnik, daß die Versiegelungsmassen in die entstandenen Ätzlücken, den sogenannten "tags", bis zu 50 µm tief eindringen und wie Borsten im Schmelz an

den Kristallen anhaften. Ähnliche Untersuchungen wurden von VAHL und WOSIEWITZ 1976 durchgeführt.

BOUNOCORE und GEWINNETT (1968) untersuchten den Grad der Retention bei unterschiedlichen Ätzbedingungen. Sie stellten fest, daß bei solchen Vorbehandlungen von Zahnoberflächen besonders die Remineralisationsschicht betroffen ist. Sie äußern Bedenken über mögliche irreversible Schmelzschädigungen, da bisher unbekannt ist, wie tief die Ätzsubstanz tatsächlich eindringt.

Auch andere Autoren versuchten herauszufinden, welche Ätzstrukturen das Anätzen auf der Zahnoberfläche erzeugt. ROCK (1974) untersuchte verschiedene Harze als Fissurenverschlußmittel. Er prüfte deren Bindefestigkeit und fand bei einer Anätzung mit 50 % Phosphorsäure eine bessere Wirkung als bei einer Ätzung mit 30% Phosphorsäure. Auch SILVERSTONE (1975) untersuchte die unterschiedliche Tiefe der Ätzwirkung in Abhängigkeit von Stärke und der Konzentration der Säuren und fand, daß die bisher von den meisten Autoren, wie auch von uns in dieser Arbeit, benutzte Ätzung mit 50%iger Säure nicht die optimale Oberflächenbehandlung sein dürfte. SILVERSTONE hält 20-30%ige Säure für das Anätzen für besser geeignet. NEWESELY (1975) zeigte, daß bei der Schmelzversiegelung durch den Ätzvorgang und durch das Aufbringen von Lacken auf die Schmelzoberfläche das Remineralisationsgleichgewicht aufgehoben bzw. erheblich gestört wird.

Wenn auch möglicherweise in absehbarer Zeit bei der Anwendung von speziellen Versiegelungslacken auf ein Anätzen mit Säuren verzichtet werden kann, so bleiben die Verfahren zur Erfassung von Oberflächenstrukturen wichtiges Hilfsmittel zur Untersuchung der verschiedenen Stadien des kariösen Prozesses.

BOYD und STEWART (1972) untersuchten in diesem Zusammenhang mit dem Rasterelektronenmikroskop die oberste prismafreie Schmelzschicht des Zahnes. Sie fanden, daß auf der Oberfläche ein Ätzmuster entsteht, das durch die unterschiedliche Löslichkeit der Schmelzprismen bedingt sein soll. Die von HOFFMANN (1972) mit dem Rasterelektronenmikroskop beobachteten Variationen im Ätzmuster werden auf die unterschiedlichen Perikymatien-Muster (pattern) zurückgeführt.

Alle, bei diesen Untersuchungen verwendeten Methoden erlauben weitgehend nur eine Beobachtung bzw. eine fotographische Dokumentation der Oberfläche in den verschiedenen Stadien der Bearbeitung. Eine quantitative Auswertung zur Feststellung von z.B. Höhenunterschieden ist nur bei ganz speziellen fotographischen Methoden, z.B. der Stereophotogrammetrie, möglich. Mit speziellen Meß- und Auswertungstechniken in Verbindung mit der Rasterelektronenmikroskopie sind zwar heute bei diesen Oberflächenuntersuchungsverfahren direkte Höhen- und Tiefenmessungen möglich, jedoch sind diese Methoden für Untersuchungen auf ganzen Zähnen nicht geeignet. Entscheidende Nachteile dieser Methoden sind, daß die Oberflächen durch Bedampfung elektrisch leitfähig gemacht werden müssen und daß die Untersuchungen im Vakuum ausgeführt werden müssen. Damit werden unter anderem Verlaufsuntersuchungen des Ätzvorganges unmöglich. Die Verfahren der direkten Oberflächenabtastung mit mechano-elektrischen Wandlern haben diese Nachteile nicht. Sie wurden deshalb auch schon wiederholt für die Untersuchung von mechanisch bearbeiteten und geätzten Hartgewebsoberflächen sowie zur Bestimmung der Oberflächenstruktur von Füllungsmaterialien verwendet. Allerdings ist mit den kommerziell verfügbaren Geräten jeweils nur die Ausmessung der Oberflächenstruktur entlang einzelner Zeilen möglich. Solche Messungen wurden z.B. von MEIER (1977) an Füllungsmaterialien zur Bestimmung ihrer Verschleißfestigkeit durchgeführt.

In dieser Dissertation finden wir einen momentanen Überblick über die Anwendung mechano-elektrischer Abtastverfahren und anderer Meßverfahren. Eine Erfassung zusammenhängender Oberflächen und der Vergleich definierter Oberflächenbereiche vor und nach einer natürlichen und artifiziellen Veränderung ist mit diesen Verfahren nicht möglich. Solche Untersuchungen sind aber mit der hier verwendeten Anordnung durchführbar. Die Anwendung des Verfahrens für diese Untersuchung einer natürlichen und artifiziell veränderten Zahnoberfläche in vitro und die dabei erhaltenen Ergebnisse werden nachstehend beschrieben.

III. MATERIAL UND MESSVERFAHREN

Meßverfahren

Bei dem von GABRIEL und KLINGER entwickelten Meßverfahren (1974, 1975, 1977, 1978) wird die Oberfläche in nebeneinanderliegenden Zeilen mit einem mechano-elektrischen Wandler abgetastet und auf einem Registrierstreifen aufgezeichnet.
Eine schematische Darstellung der Meßanordnung zeigt die Abbildung 1 (Seite 9). Eine mit dieser Anordnung gemessene Schar von Meßkurven auf einer Zahnoberfläche zeigen die Abbildungen 3 und 4.
Das Präparat liegt auf einem Präparathalter P, der sich auf dem Präparatschlitten befindet. Dieser Halter wird so eingestellt, daß sich der Mittelpunkt des Präparates unter der Diamantnadel eines am Grundkörper fest angebrachten Oberflächenrauhigkeitstasters T befindet. Der mechano-elektrische Wandler ist der Tastkopf eines Oberflächenrauhigkeitsmeßgerätes (Pertho-Meter, WVT 1, Firma Perthen/Hannover). Der Mikrotaster hat eine Diamantenspitze mit dem Radius 3 µm, die Auflagekraft der Spitze beträgt bei diesen Messungen 80 mp. Bei Bewegung des Schlittens in X-Richtung gleitet das darauf fest montierte Präparattischchen unter der Diamantspitze hinweg. Die Spitze registriert dabei die Höhenunterschiede der Präparatoberfläche auf einer beliebig langen genau definierbaren Länge mit Hilfe der Meßelektronik E. Nach Abtastung einer Zeile wird der Schlitten in die Ausgangslage zurückgefahren und mit dem Feintrieb S die Zeilenverstellung in Z-Richtung um 10 µm weitergedreht. Das Abfahren der nächsten Zeile kann erfolgen. Ein XY-Schreiber registriert die Vertikalbewegung der Abtastspitze (Y-Koordinate) und die über einen Potentiometer gemessene Schlittenbewegung (X-Koordinate). Über dem Oberflächenrauhigkeitstaster ist ein Mikroskop mit einer aufsetzbaren Kamera M fest montiert.

Anordnung zur Messung von Oberflächen-Profilen
(schematisch)

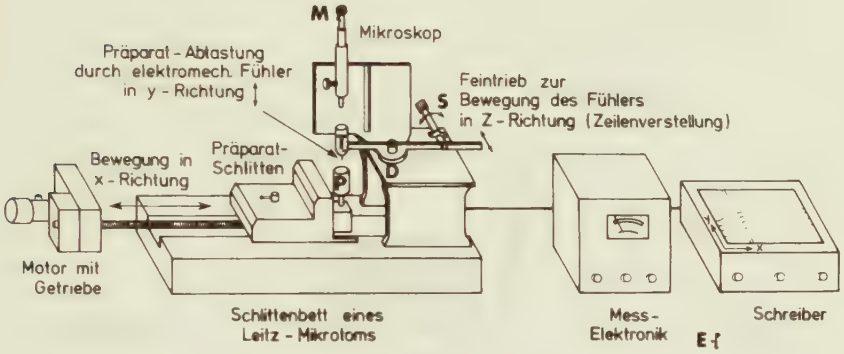


Abb. 1:

Anordnung zur Messung und Registrierung der Oberflächenfeingestalt (schematisch, nach GABRIEL, 1974)

P: Präparathalter

T: Oberflächenrauhigkeitstaster

E: Meßelektronik mit Anzeigegerät für Oberflächenrauhigkeitstaster

M: Mikroskop mit aufsetzbarer Kamera

D: Drehachse für Bühne, auf der das Mikroskop und der Tastkopf starr befestigt sind

S: Mikrometerschraube zur Verstellung der Drehbühne

Jeder abgetasteten Zeile entspricht eine Meßkurve des Schreibers, die im Abstand von ca. 2 cm aufgeschrieben wird. Jede Kurve gibt die Höhenunterschiede der Präparatoberfläche entlang einer Abtastspur wieder. Zur Frage der Reproduzierbarkeit von Abtaststrecken an unbehandelter und geätzter Zahnoberfläche siehe GABRIEL und KLINGER (1977).

Material und Methode

Die Untersuchungen werden an der Oberfläche eines extrahierten menschlichen Schneidezahnes durchgeführt. Das Meßareal wurde in das mittlere Drittel der labialen Fläche des Zahnes gelegt, um eine möglichst plane Oberfläche für die Messungen zur Verfügung zu haben.
Es wurden jeweils 31 Zeilen im Abstand von 10 µm vor und nach dem Anätzen abgefahren. Die Länge einer jeden Spur ist 2700 µm.

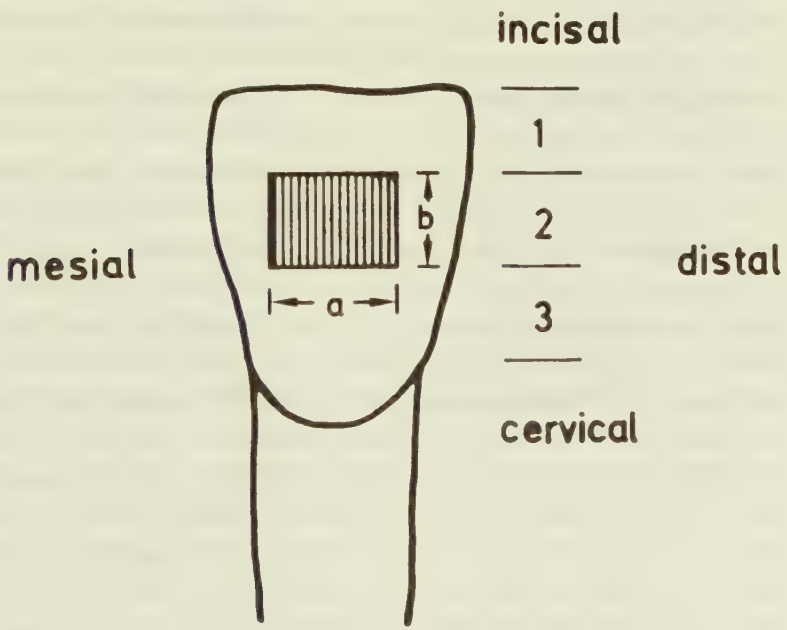


Abb. 2

Skizze des Zahnes und Lage der untersuchten Oberfläche. Die eingezeichneten Linien im markierten Feld zeigen die von cervikal nach inzisal (b) in ihrer Länge abgefahrenen Spuren. (a) zeigt die im Abstand von 10 µm abgefahrenen 31 Spuren.

IV. ERGEBNISSE

Das in der Abbildung 2 angegebene Meßfeld wurde zunächst vor der Ätzung mit der beschriebenen Meßordnung abgetastet. Die so erhaltene Kurvenschar zeigt die Abbildung 3. Betrachten wir den Verlauf einer Kurve vor dem Ätzen, so erkennen wir deutlich Vertiefungen in regelmäßigen Abständen. Das sind die den Perikymatien zuzuordnenden Täler. Die Welligkeit der Perikymatien überlagert eine auf der Zahnoberfläche zusätzlich vorhandene grobe Welligkeit. Beim Betrachten der gesamten Kurvenschar zeigt sich ein nahezu flacher Verlauf der Kurven im Abschnitt A, während im Abschnitt B die Kurven bis zu einem Gipfel ansteigen und dann steil abfallen. Auf Grund dieses unterschiedlichen Verlaufs wurde von uns in allen folgenden Abbildungen diese Aufteilung in Abschnitt A und B vorgenommen. In der Abbildung 4 sind die 31 Spuren des Meßareals nach dem Anätzen wieder aufgezeichnet worden. Folgendermaßen wurde hier beim Ätzen vorgegangen: das Präparat wurde auf der Abtastanordnung belassen, mit der Zeilenverstellung wurde wieder auf den ursprünglichen Ausgangspunkt zurückgegangen, um reproduzierbar den gleichen Meßbereich messen zu können. Das Anätzen erfolgte mit 50 % Phosphorsäure, die eineinhalb Minuten auf das Präparat einwirken konnte. Nach einer vorsichtigen Säuberung mit Wasser und Trocknung konnte in der gleichen Meßanordnung wie in Abbildung 3 das Meßareal der 31 Spuren abgetastet werden. Der Verlauf der entstandenen Oberflächenprofilkurven zeigt wiederum einen nahezu flachen Abschnitt, den wir wie in Abbildung 3 ebenfalls A genannt haben. Im Abschnitt B zeigt sich ein Anstieg zu einem Gipfel und dann ein steiler Abfall im Verlauf der Kurven. Die im Vergleich der beiden Abschnitte A und B deutlich auftretenden unterschiedlichen Ätzmuster werden später noch in Ausschnitten genauer beschrieben. Hier soll nur auf die im Bereich B, im abfallenden Teil der Kurve, entstandenen tiefen Ätztäler hingewiesen werden. Diese quer zur Zahnlängsrichtung verlaufenden Täler lassen sich sehr gut über die gesamte Kurvenschar verfolgen. Im Abschnitt A, dem flachen Teil der Kurven, zeigt sich mehr eine flächenhafte Ätzung, die auf eine räumlich konstante Löslichkeit in diesem Bereich hindeutet.

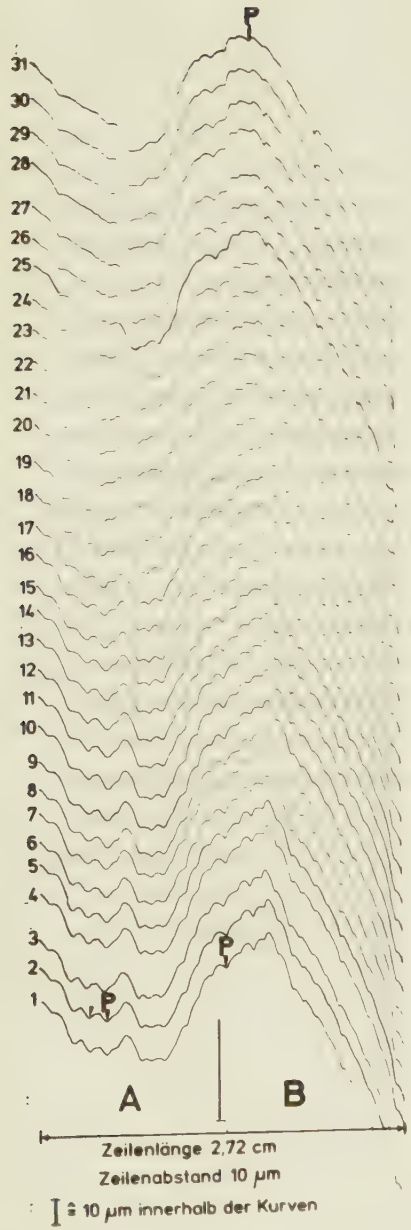


Abb. 3

Oberflächenprofilkurve der unbehandelten Zahnoberfläche. Es sind 31 Spuren in diesen Kurven wiedergegeben, deren Länge 2,72 mm beträgt. Der Zeilenabstand der Spuren ist 10 µm entsprechend 2 cm Kurvenabstand. Bei P sind Perikymatien zu erkennen. Es sind, wie auch in den folgenden Darstellungen, die Kurven in einen stark aufsteigenden Bereich B und in den flachen Teil A aufgeteilt worden.

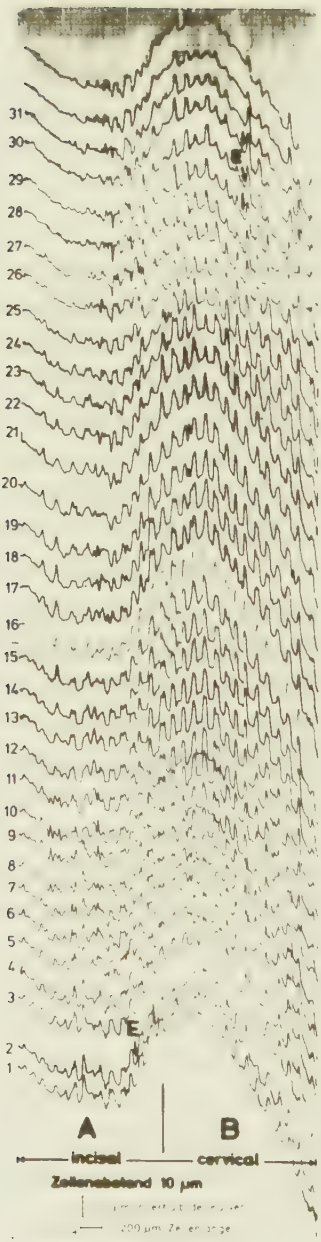


Abb. 4

Oberflächenprofilkurve der geätzten Zahnoberfläche. Dasselbe Meßareal wie in Abb. 3 ist nach Anätzen mit 50 % Phosphorsäure (1 1/2 Minuten) wiederum abgetastet worden. Der Maßstab entspricht dem in der Abb. 3. Die gemessenen Kurven zeigen ebenfalls den stark aufsteigenden Teil B und den flachen Bereich A.
Im Bereich B sind die mit E bezeichneten Ätztäler sehr gut zu erkennen. Im Teil A sind diese Täler kleiner und auch nicht mehr so gut über mehrere Zeilen hinweg verfolgbar wie im Abschnitt B.
(E = tiefe Ätztäler).

In den Abbildungen 4 und 5 sind jeweils in den einzelnen Meßkurven der unbehandelten und der geätzten Zahnoberfläche die Tiefpunkte markiert und gradlinig miteinander verbunden worden. Es wurde nun versucht, eine Zuordnung zu finden zwischen der Oberflächenstruktur des Meßbereichs vor der Ätzung und der durch die Ätzung entstandenen Strukturen. Hierzu wurden in jeder Meßkurve die Perikymatientiefpunkte in der Längsrichtung des Zahnes miteinander verbunden. Dann wurden auch quer zur Längsrichtung der Zahnoberfläche, also von Spur zu Spur die Perikymatientiefpunkte in den Meßkurven miteinander verbunden.
Das ergab die in der Abbildung 5 von unten nach oben verlaufenden Verbindungslinien. In der gleichen Weise wurde in der Abbildung 6 mit den Ätztaltiefpunkten verfahren. Somit entstanden ein über alle 31 Spuren hinweg verfolgbares Verlaufsmuster der Perikymatientiefpunkte und der Ätztaltiefpunkte. Die Kontinuierlichkeit dieser Strukturen und die Regelmäßigkeit im Verlauf über eine größere Fläche hinweg zeigt sich in diesen Verbindungslinien quer zur Längsrichtung der Zahnoberfläche, also in Perikymatien- bzw. Ätztalrichtung recht deutlich.
Der Vergleich dieser beiden Abbildungen, die der Kurvenschar der Perikymatien und der Ätztäler, deutet darauf hin, daß die Anätzbarkeit von Zahnoberflächen möglicherweise gerade an diesen Perikymatientiefpunkten sehr groß ist. Durch die damit mögliche starke Oberflächenvergrößerung dieser Schmelzareale bei einer Ätzung scheinen uns diese Bereiche bei der Versiegelung der Zahnoberfläche besonders beachtenswert zu sein.

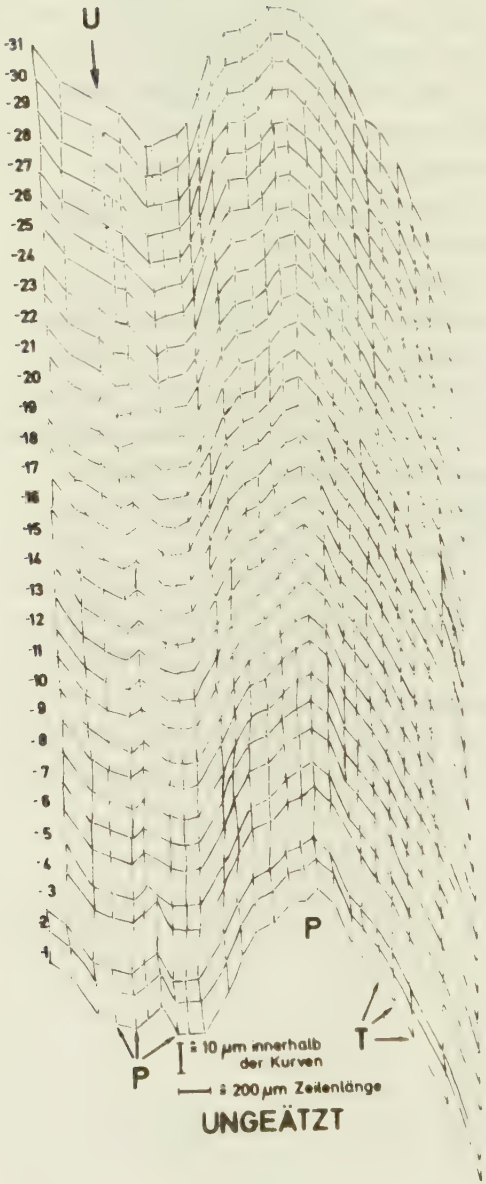


Abb. 5

Darstellung des Verlaufs der Perikymatien-Talsohlen durch Verbindungslinien.
Alle Perikymatientiefpunkte werden innerhalb einer Spur linear verbunden. Zur Darstellung des Verlaufes der Perikymatien im gesamten Meßfeld sind diese Tiefpunkte von Zeile zu Zeile miteinander durch Verbindungslinien aufgezeichnet worden. P zeigt die Perikymatientiefpunkte. Im mit U gekennzeichneten Bereich sind einige Verbindungslinien zu erkennen, die auslaufen, versetzt weiterlaufen oder auch plötzlich endigen. Dies zeigt, daß hier Perikymatien enden oder sich verzweigen. Genaue Aussagen über den Verlauf dieser Strukturen sind in diesem unregelmäßigen Bereich nicht möglich.

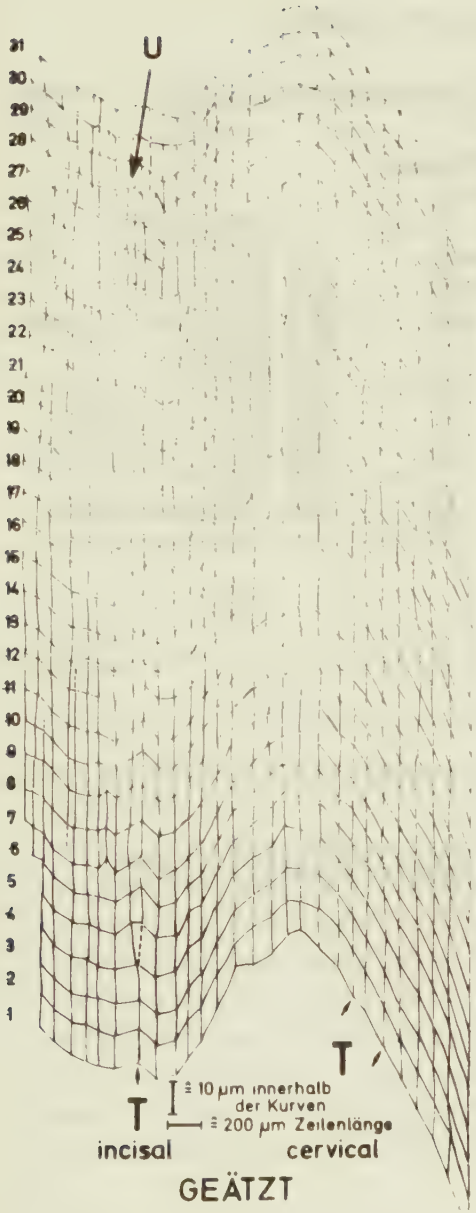


Abb. 6

Darstellung des Verlaufs der Ätztal-Talsohlen durch Verbindungslinien.
In den Oberflächenprofilkurven der geätzten Oberfläche wurden die Ätztaltiefpunkte korrespondierender Kurven verbunden, so daß die Verbindungslinien den Verlauf der Ätztäler im Meßfeld ergeben. Es zeigt sich ein sehr gradliniger und regelmäßiger Verlauf der Ätztäler im gesamten Meßfeld. B T kennzeichnet die Ätztaltiefpunkte. Ein unregelmäßiger Verlauf bei U ist gut zu erkennen. Hier laufen, wie auch in Abb. 5, einzelne Verbindungslinien aus oder versetzt weiter.
Im Bereich A sind einzelne Ätztäler nicht mehr über mehrere Meßspuren hinweg verfolgbar.

Häufigkeitsverteilung der Perikymatien-Abstände

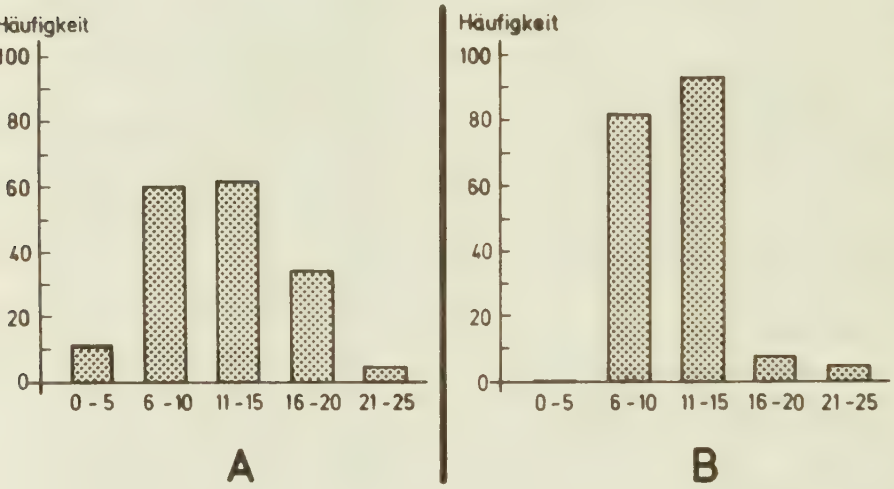


Abb. 7

Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Perikymatien-Abstände

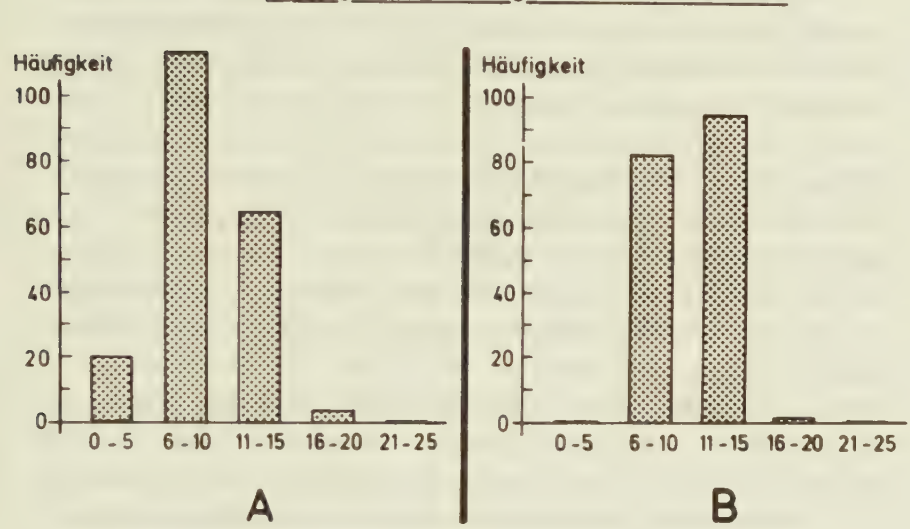


Abb. 8

Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Ätztalabstände

Zu den Abbildungen 7 und 8: In der Aufteilung in die Bereiche A (flacher) und B (steiler Teil) ist in diesen vier Aufstellungen die Häufigkeit des Vorkommens von verschiedenen Abständen der Perikymatien sowie der Ätztäler gegenübergestellt. Aus den jeweiligen Originalregistrierkurven wurde jede zweite Kurve zur Auswertung herangezogen und die Abstände in fünf verschiedene Klassen aufgeteilt (siehe auch Text Seite 18). Die Klassenaufteilung wurde anhand der auf den Originalstreifen (Abb. 3 und Abb. 4) in mm ausgemessenen Abstände der Amplituden in den Registrierkurven vorgenommen. 1 mm in der Registrierkurve entspricht dabei einem tatsächlichen Abstand im Präparat von 10 µm . Die Klasse 0-5 enthält somit alle Perikymatien-Abstände zwischen 0 und 50 µm.

In den Abbildungen 7 und 8 ist die Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Perikymatien- und Ätzabstände auf der untersuchten Fläche dargestellt. Dazu wurden in der Abbildung 3 die Abstände der Perikymatien, bzw. in der Abbildung 4 die Abstände der Ätztäler jeweils in jeder zweiten Meßkurve über die gesamte Länge des Meßfeldes ausgemessen. Die Gesamtzahl der jeweilig gemessenen Täler wurde in Klassen von je 50 µm Umfang eingeteilt und in den Abbildungen 7 und 8 die Klassenhäufigkeit gegen den Klassenumfang aufgezeichnet und graphisch dargestellt.
Das gesamte Meßfeld wurde in eine rechte Hälfte A, dem flachen Anteil der Kurven und in eine linke Hälfte B, dem steilen Teil, eingeteilt. Die Trennung der Bereiche A und B erfolgte bei Perikymatiental 13, ebenso wurde bei den Ätztälern verfahren.
Die unterschiedliche Verteilung der Abstände der Perikymatien in den beiden Bereichen wird aus der Abbildung 7 erkennbar.
Während im Bereich B die Abstände sehr gleichmäßig zwischen 80-120 µm liegen, variieren sie im flachen Bereich A zwischen 50-200 µm beträchtlich. Bei den Ätztalabständen in der Abbildung 8 zeigt sich im linken Teil B praktisch die gleiche Verteilung wie im Teil B der Perikymatienabstände. Im ungeätzten Bereich A zeigt die Verteilung der Perikymatienabstände eine verhältnismäßig breite Streuung. Durch die Ätzung verschwanden offensichtlich breite Täler (d.h. große Abstände) dadurch, daß in ihnen schmale, kleine Täler entstehen. Das zeigt sich auch daran, daß die Zahl der Ätztäler mit 202 größer ist als die Zahl der Perikymatien mit 172. Zum Löslichkeitsabtrag läßt sich quantitativ sagen, daß er im Bereich A größer ist als im Bereich B.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen werden Ausschnitte aus den Originalkurven (Abb. 3 und 4) der unbehandelten und der geätzten Oberfläche dargestellt. Diese Ausschnitte sind charakteristisch für die Bereiche A und B. Sie sind auch wichtig für die Zuordnung bestimmter Strukturen von unbehandelter und geätzter Zahnoberfläche im gesamten Meßfeld.

So zeigt die Abbildung 9 nebeneinander aufgezeichnet einige Perikymatien und entsprechende Ätztäler, die aus der gesamten Kurvenschar für den Bereich A und den Bereich B ausgewählt wurden. Es lassen sich deutlich die Ätztäler den Perikymatien zuordnen, besonders im Bereich B zeigen sich tiefe Ätztäler, die den Substanzverlust beim Ätzen gerade in den Perikymatientiefpunkten kennzeichnen. Der Angriffspunkt der Ätzwirkung scheint eindeutig in diesen Vertiefungen auf der Oberfläche zu liegen (Abb. 9, siehe Seite 22).

Die Abb. 10a auf der Seite 23 zeigt sechs Spuren der Kurvenschar der Originalkurven der Abb. 3, wiederum aufgeteilt in den flachen Bereich A und den steilen Bereich B. Hierbei wurden jeweils unter die Kurven der unbehandelten Zahnoberfläche (gerade Ziffern) die Kurven der geätzten Zahnoberfläche aus der Abb. 4 aufgezeichnet und entsprechend dem Relief des Kurvenverlaufes und in Zuordnung von Perikymatien zu den entsprechenden Ätztälern dargestellt.

Aus dem oberen Teil der Kurvenscharen im Bereich A wurde in derselben Art ein Ausschnitt in Abb. 10b aufgezeichnet, der durch seine Unregelmäßigkeit schon in den Abbildungen 5 und 6 aufgefallen ist. Hier läßt sich durch die ungleichmäßigen einander nicht zuzuordnenden Strukturen vor und nach dem Ätzen keine Regelmäßigkeit im Ätzabtrag erkennen.

Beim Vergleich der Bereiche A und B in der Abb. 10a zeigt sich im flachen Teil A eine starke Löslichkeit, die sehr flächenhaft zu sein scheint. Berg- und Talstrukturen sind nach dem Ätzen nicht mehr genau zu verfolgen und zuzuordnen. Im Abschnitt B dagegen wird in den tiefen fast gleich großen Einschnitten der Ätztäler ein ziemlich konstanter Ätzverlust an den Perikymatienvertiefungen sichtbar.

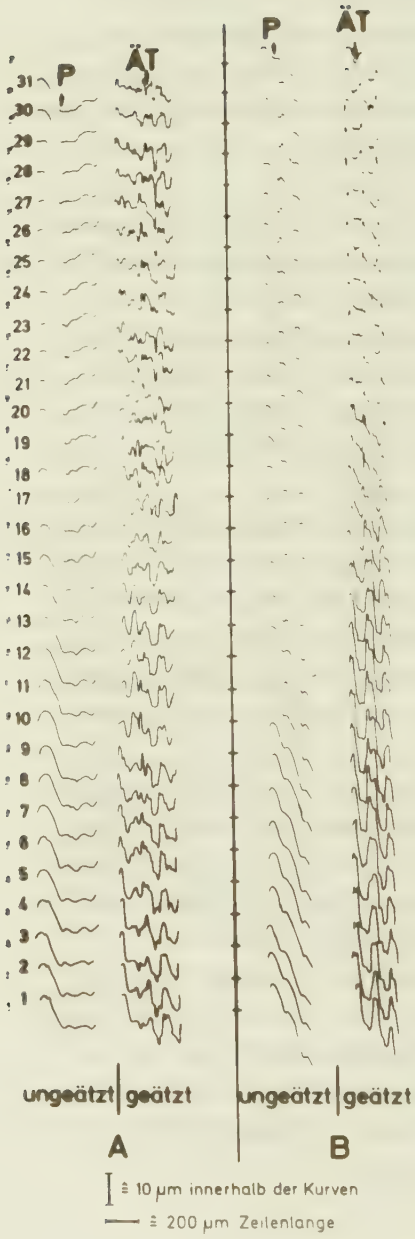
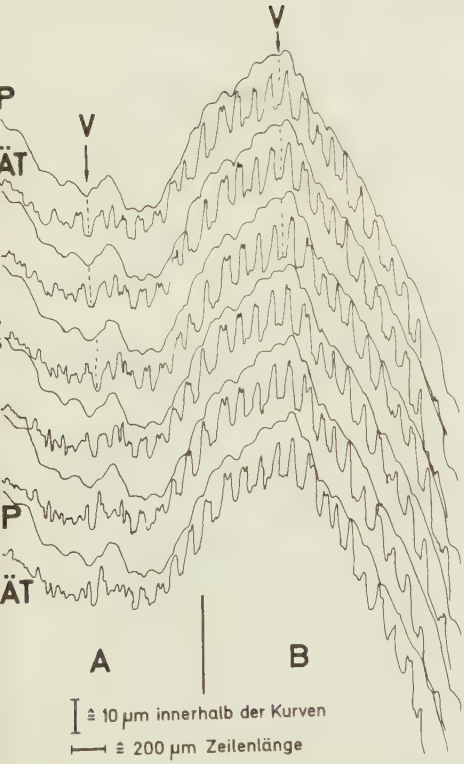


Abb. 9

Vergleich von einigen Perikymatien und entsprechenden Ätztälern nebeneinander über alle Spuren hinweg.
(Ausschnitt aus Abb. 3 und 4)
Es sind hier an charakteristischen Stellen im flachen Bereich A sowie im steilabfallenden Teil B zwei bis drei Perikymatien und entsprechende Ätztäler nebeneinander aufgezeichnet worden. Bei P sind diese Perikymatien als Vertiefungen zu erkennen, bei ÄT sehen wir neben kleinen Talstrukturen auch deutlich tiefe Ätztäler, die den Perikymatien-Vertiefungen entsprechen.
Im Bereich B sind durch Ansätzen besonders tiefe Ätztäler gerade an den Perikymatientiefpunkten entstanden. Eine deutliche Berg- und Talstruktur im Ätzrelief kennzeichnet an diesen Punkten den Ätzverlust.

Abb. 10a



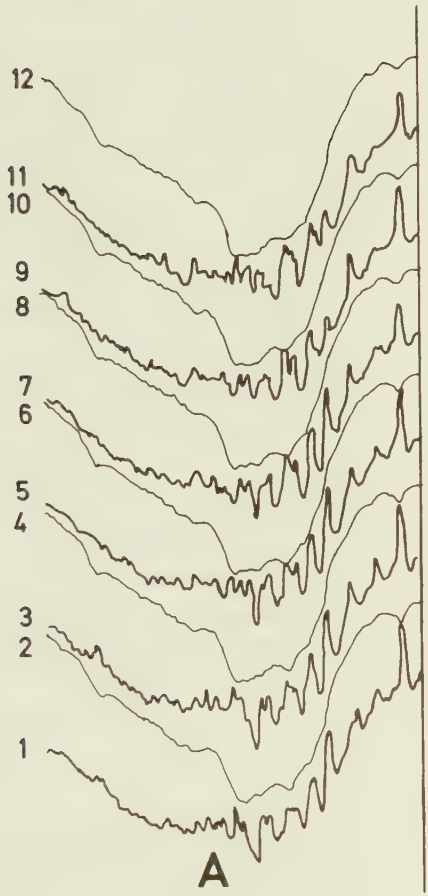


Abb. 10b

Erläuterungen zu Abb. 10a und 10b siehe folgende Seite

Erläuterungen zu Abb. 10a und b

Darstellung des Ätzverlustes bei einigen Spuren durch Gegenüberstellung von Ätztalkurve und entsprechender Perikymatienkurve.
An zwei charakteristischen Ausschnitten im unteren Teil (Abb. 10a) und im rechten oberen Teil (Abb. 10b) der beiden Originalkurven der unbehandelten und der geätzten Zahnoberfläche sind hier unter die jeweilige Kurve der Perikymatiendarstellung (gerade Ziffern) die entsprechende Kurve mit den Ätztälern gezeichnet worden. In den unterschiedlichen Bereichen A und B (siehe auch Text Seite 20) sind qualitativ die Flächen des Ätzverlustes bzw. des Ätzabbaues zwischen den jeweiligen Kurven zu erkennen. Ein unregelmäßiger Bereich im Teil B (Abb. 10b) zeigt kleine unregelmäßige Zacken im Verlauf beider Kurven, eine genaue Zuordnung von Perikymatie zu Ätztal bzw. der genaue Ätzverlust ist nicht zu bestimmen.
Die Zeilen 1, 3, 5, 7, 9 und 11 in der Abbildung 10a entsprechen den Zeilen 8 bis 13 in der Abbildung 4.
Die Zeilen mit den geraden Zahlen entsprechen den Zeilen 8 bis 13 in der Abbildung 3. In der Abbildung 10b wurde mit dem Ausschnitt aus den Zeilen 25-31 aus den beiden Abbildungen 3 und 4 entsprechend verfahren.

Technische Schwierigkeiten in der Abtasttechnik und mangelnde Bezugspunkte als Markierungshilfen ergeben noch eine leichte Verschiebung der beiden Kurvenscharen zueinander, jedoch kann das Feld zwischen den Kurven der unbehandelten und der behandelten Oberfläche als Fläche des Ätzabtrages bzw. des Ätzverlustes angesehen werden.
In der Abbildung 11 wurde zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Oberflächenprofile der im Abstand von 10 µm abgetasteten Spuren die Kurven von sechs nebeneinander liegenden Spuren aufeinander projiziert. Dies erfolgte sowohl bei den Kurven der unbehandelten und der geätzten Oberfläche. Es zeigt sich, daß zwar im groben Relief die nebeneinander liegenden Spuren sich stark ähneln, jedoch in kleinsten Feinheiten nicht identische Kurven bzw. Abtastspuren sich ergeben.

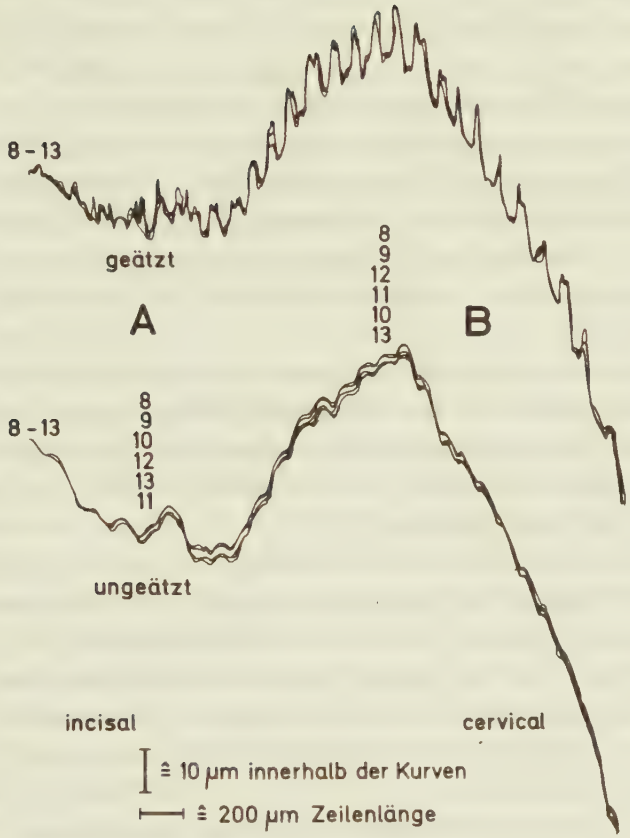


Abb. 11

Übereinanderprojizierung mehrerer Spuren der geätzten und der ungeätzten Oberfläche

Die Meßkurven 8-13 sind vor und nach dem Ätzen übereinandergezeichnet. Die Darstellung zeigt, daß in einem Bereich, der von 6 Kurven mit einem jeweiligen Abstand von 10 µm gemessen wurde, geringe Unterschiede von Kurve zu Kurve sowohl im unbehandelten Oberflächenprofil wie auch im geätzten Zustand zu erkennen ist.

A: flach abfallender Teil, B: steil abfallender Teil.

V. DISKUSSION

Der Vergleich der Oberflächen-Profilkurven vor und nach der Ätzung ermöglicht die Ermittlung relativer Unterschiede des Löslichkeitsverhaltens auf dem zu untersuchenden Bereich der Zahnoberfläche. Großräumig gesehen nimmt im Ätzareal die Gesamtoberfläche zu, das heißt, es findet eine Bildung von Ätzvertiefungen statt. Die Ausbildung solcher Ätzvertiefungen im gesamten Untersuchungsfeld ist nicht gleichmäßig. Es gibt vielmehr Bereiche, in denen die Ätzwirkung und die Bildung von Ätzvertiefungen überwiegend in den Vertiefungen der Perikymatien stattfindet.

In den Abbildungen 5 und 6 sind über das gesamte Meßfeld von 31 Spuren die jeweiligen Perikymatien- und Ätztaltiefpunkte verbunden worden. Beide Abbildungen zeigen ein fast überall sehr einheitlichesund regelmäßiges Bild. Der unterschiedliche Ätzabtrag in verschiedenen Bereichen wird aus den Abbildungen 10a und 10b deutlich.

Auf die bevorzugte Anätzung im Bereich der Perikymatientäler haben schon PANTKE und HEUSER 1959 mit ihrer Replica-Technik und lichtmikroskopischen Aufnahmen hingewiesen. Die Täler sind offensichtlich nicht nur deswegen Ausgangsorte für den kariösen Demineralisationsprozeß, weil sich in diesen natürlichen Retentionsnischen besonders leicht Bakterien ansiedeln können, sondern auch, weil hier außerdem eine besonders leichte Löslichkeit vorhanden ist.

Im untersuchten Oberflächenareal finden wir aber auch einen Bereich, in dem sich eine eindeutige Zuordnung von geätzten und ungeätzten Strukturen nicht durchführen läßt.

In der Abbildung 3 sind oben links vor der Ätzung Perikymatien nur schwach oder überhaupt nicht zu erkennen (siehe auch Abbildung 5 bei U). In den Ätzprofilkurven dieses Bereiches U (siehe gleiche Bereiche U in den Abbildungen 4 und 6 oben links) treten auch keine klaren systematischen Ätzmuster, zum Beispiel über mehrere Zeilen hinweg durchlaufende Täler

hervor. Es findet vielmehr eine flächenhafte Abätzung statt, das Ätzmuster der entstehenden Oberfläche ist fein und unregelmäßig rauh strukturiert (siehe Abbildung 10b, Ausschnitt unregelmäßiger Bereich im Abschnitt A).

Diese unregelmäßige Anätzbarkeit beschreibt auch HOFFMANN (1972) anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Er findet zwei verschiedene Typen von Perikymatien, "the undulating and the overlapping forms". Er bestätigt bei dem Typ der "overlapping form" eine bevorzugte Anätzbarkeit im Bereich der Perikymatientäler.

Zum Vergleich der Oberflächenstrukturen von geätzter und ungeätzter Oberfläche wurde versucht, den Verlauf der Talstrukturen heranzuziehen. In den Abbildungen 5 und 6 sind diese Talverläufe und zwar der Perikymatien-Vertiefungen wie auch der Ätztal-Vertiefungen, dargestellt. Es zeigt sich, daß es eine große Gruppe von Perikymatien gibt, die sehr gut gleichmäßig und unverzweigt verlaufen (Bereich B in Abbildung 5). Ebenso gibt es eine zweite Gruppe von Perikymatien (Bereich A in Abbildung 5 und Abbildung 10b oben links), die nicht so deutlich und nicht so tief abgebildet sind. Im Bereich dieser Perikymatien finden sich zudem Verzweigungen und Endigungen. Beim Anätzen treten nun einige vorher nicht oder kaum deutlich nachzuweisende Täler deutlicher hervor, wobei sich an einigen Stellen eine Art von Nebentälern herausbildet (besonders deutlich in Abbildung 9, Bereich U oben links und in Abbildung 10b).

Auch in den Abbildungen 7 und 8, in denen die Häufigkeit verschiedener Perikymatien-beziehungsweise Ätztalabstände dargestellt wurde, zeigt es sich, daß die Zahl der Ätztäler gegenüber der Zahl der Perikymatien zugenommen hat. Das Vorhandensein solcher Unregelmäßigkeiten im Perikymatienverlauf, aber auch in dem entstehenden Ätzmuster, legt den Schluß nahe, daß die davon betroffenen Perikymatien zu Retziusebenen gehören, in denen der Zahn gewissen Mineralisations- oder Wachstumsstörungen unterworfen war.

Die gleichmäßig ausgebildeten Perikymatien waren von diesen Störungen nicht betroffen. In noch nicht veröffentlichten Versuchen (KÜNZEL 1979, GABRIEL, KÜNZEL, KLINGER 1979) wurden einige Oberflächen mit Perikymatien nicht nur einmal profilographisch gemessen, sondern bis zu dreimal weitergeätzt und zum Vergleich jeweils gemessen. Hier zeigte sich auch nach mehrmaligem Ätzen eine Weitervertiefung der Talstrukturen, die dem Ausgangspunkt des Perikymatienmusters entsprechen. Dies würde auch der Ansicht von GUSTAVSON entsprechen, nämlich, daß Perikymatien Abknickungen und Endigungen von Retziusstreifen sind und daß sich beim Anätzen von Oberflächen besonders solche Strukturen auflösen, die den Retziusstreifen entsprechen müssen

In der Ausschnittdarstellung 9 wurden jeweils entsprechende Perikymatien- und Ätztalprofile nebeneinander dargestellt. Die Auswahl der Kurvenscharen in Bereich A und B zeigt deutlich, daß die entstandenen Ätzmuster sehr typische unterschiedliche Strukturen aufweisen.

Im Bereich B sind deutlich Ätztäler in ziemlich gleichmäßiger Tiefe entstanden. Auch die Abbildung 10a, in der einige Spuren der unbehandelten und der geätzten Oberfläche untereinander dargestellt werden, zeigt im Bereich B deutlich diese tiefen Einschnitte.

Wenn auch in diesem Bereich die Ätzwirkung auf diese Strukturen sehr gleichförmig zu sein scheint, so ist doch von der Gesamtheit der durch Ätzen in diesem Bereich entstandenen Strukturen zu sagen, daß sie nicht eindeutig den Strukturen der geätzten Oberfläche zuzuordnen sind. Trotz großer Gleichheit zeigt, wie in Abbildung 11 zu sehen, jede Spur, die hier übereinander projiziert gezeichnet wurden, minimale Veränderungen. Dies deutet darauf hin, daß nicht nur im Groben, sondern auch in Feinheiten unterschiedlich Ätzwirkungen vorliegen.

Die Ausbildung solcher Feinheiten hängt auch von der Art der Ätztechnik ab, wie aus den Arbeiten von SILVERSTONE (1975) hervorgeht. Er untersuchte die Zusammenhänge zwischen Ätztiefe und der Ätzmuster in Abhängigkeit von Konzentration, Stärke und Art verschiedener Säuren im Bereich einzelner Schmelzprismen.

Er stellte in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen die unterschiedliche Wirkungsweise verschiedener Säuren heraus und zeigte gerade im Zusammenhang der Versiegelung von Oberflächen, daß gewisse Ätzstrukturen geeignet sind, eine besonders gute Haftung dieser Versiegelungsmassen zu gewährleisten. Poröse und aufgelockerte Strukturen von Zahnoberflächen, wie sie Silverstone mit rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen dargestellt hat, lassen sich auch mit Hilfe unserer profilometrischen Methode sehr genau über größere Flächenareale hinweg darstellen, wenn auch mit nicht so gutem Auflösungsvermögen und nicht ohne mechanische Zerstörung von Mikrobereichen. Demgegenüber bietet das profilometrische Verfahren Vorteile einer direkten qualitativen Erfassung der Tiefenstruktur der geätzten Oberfläche.

Damit stellt dieses Verfahren eine Alternative zur Rasterelektronenmikroskopie dar, wenn Fragen der Optimierung von Zahnoberflächenätzungen für die Anwendung von Versiegelungstechniken untersucht werden sollen. Ein Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß die flächenhafte Erfassung der Oberflächenstruktur nicht im Vakuum geschehen muß, sondern sogar auf feuchten Oberflächen, also z.B. auch während des Ätzens, durchgeführt werden kann.

Unsere Untersuchungsergebnisse zeigen somit in Ergänzung zu früheren Untersuchungen an Zahnschliffoberflächen, daß das von uns angewendete Verfahren geeignet ist, Veränderungen auf der natürlichen Zahnoberfläche in sehr kleinen Bereichen zu messen, die durch den Ätzabtrag von diesen Schichten im 1/10 µm Bereich entstanden sind.

Die bisherige Meßanordnung ist jedoch nur dazu geeignet, relative Unterschiede in eng benachbarten Arealen der untersuchten Oberfläche festzustellen. Die Bestimmung des absoluten Ätzabtrages über größere Bereiche erfordert die Festlegung von Bezugspunkten für die Messung und die Verbesserung des mechanischen Aufbaus der Meßanordnung, um eine bessere Reproduzierbarkeit der Meßfeldjustierung vor und nach dem Ätzen zu gewährleisten.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung der Oberflächenfeingestalt von Zahnhartgewebsoberflächen wird ein Verfahren vorgestellt, welches auf Flächenarealen den Vergleich von Oberflächenstrukturen vor und nach dem Ätzen mit Hilfe der Profilometrie ermöglicht.

Auf der labialen Oberfläche eines menschlichen Incisivus wurde auf dem mittleren Drittel mit Hilfe des dargestellten Verfahrens die Struktur der natürlichen unbehandelten Oberfläche und die Struktur der gleichen Oberfläche nach dem Ätzen mit Phosphorsäure untersucht. Es wurden Bereiche gefunden, in denen die Ausbildung von Ätzvertiefungen sehr gleichförmig und regelmäßig in Korrelation zu den Perikymatien stattfindet, was auf ein relativ konstantes Löslichkeitsverhalten an diesen Oberflächen hinweist.

Andere Bereiche zeigen dagegen ein völlig ungleichförmiges Löslichkeitsverhalten. Hier entstehen unregelmäßige Strukturen, die ein eindeutiges Zuordnen von Ätztal und Perikymatie nicht zulassen. Das entstandene Ätzmuster ist vielmehr flächenhaft, die Ätztäler sind diffus verteilt.

LITERATURVERZEICHNIS

1. BARNES, J.E. — Study 2. The Adaptation of Composite Resins to Etched Enamel. Brit. dent. J. 85, 15.142 (1977)

2. BUONOCORE, M.G. and GWINETT, A.J. — Penetration of resin dental materials into enamel surface with reference to bonding. Arch. oral Biol. 13.61 (1968)

3. BUONOCORE, M.G. — Caries prevention in pits and fissures sealed with an adhesive resin polymerized by ultraviolet light. Journal of the American Dental Assosiation, 82, 1090-1093 (1971)

4. BURKHARDT, W. — Anwendbarkeit und Grenzen der Oberflächenhistologie (Replica-Methode) an Zahnschliffen. Med. dent. Diss. Tübingen (1964)

5. BOYDE, A. — Scannig electron microscopy of the completed enamel surface Tooth enamel II R.W. Fearnhead, M.V. Stade, Wright, Bristol, S. 39 (1971)

6. EISENBERG — A microscopial study of the surface enamel of human teeth. Anat. Rec. 71, 221 (1938)

7. GABRIEL, E. — Entwicklung, Verbesserung und Anwendung von Methoden zur quantitativen Untersuchung der Zahnhartsubstanzen und des Zahnhalteapparates. Habilitationsschrift Universität Würzburg (1974)

8. GABRIEL, E. und KLINGER, H.G. — Untersuchungen zur Grobstruktur geätzter Schmelzoberflächen. Dtsch. zahnärztl. Z. 31, 817-818 (1976)

9. GABRIEL, E. und KLINGER, H.G. — Bestimmung der Oberflächentopographie von geätzten Zahnschliffen. Dtsch. zahnärztl. Z. 33, 146-150 (1978)

10. GABRIEL, E. KÜNZEL, A. KLINGER, H.G. 1979 — Solubility and etching patterns of human enamel in consecutive layers of the tooth surface. ORGA-Congress, Abstract 54, 28-30 th. June 1979, Stirling/Scotland

11 GUSTAVSON, A. — A morphologic investigation of certain variations in the structure and mineralisation of human dental enamel. Odontol, Tidskr. 67, 361-472 (1959)

12. HELMCKE, J.G. und RIENITZ, J. — Untersuchungen der Schmelzoberfläche menschlicher Zähne mit Interferenz- und Phasenkontrastmikroskopie sowie Licht- und Elektronen-Stereomikroskopie. Mikroskopie, 13, 345 (1959)

13. HELMCKE, J.G. und SCHULZ, L. — Elektronenmikroskopische Beobachtungen an Retziusstreifen von gesundem menschlichem Schmelz und im kariösen Bereich. (Vorläufige Mitteilung) Bull. Croup. int. rech. Sci. Stomat 11, 257-278 (1968)

14. HEUSER, H. — Die Struktur des menschlichen Zahnschmelzes im oberflächlichen histologischen Bild (replica) Archs. oral. Biol. 4, 50 (1961)

15. HEUSER, H. und PANTKE, H. — Oberflächenhistologische Untersuchungen an jungsteinzeitlichen Zähnen. Stoma, 14, 25 (1961)

16. HOFFMANN, S. — Variations in surface resistance to enamel etching. J. dent. Res. Vol. 51, 3, 795-799 (1972)

17. HOFMANN, K. L. — Erfassung von Veränderungen der Zahnschmelzoberfläche unter einem nicht festsitzenden kieferorthopädischen Band. Diss. Würzburg 1977

18. HORN, W. — Grundlage und Instrumente neuerer Auflicht- und Kontrast-Methoden. Fachbericht für Oberflächentechnik, 7, 1 (1969)

19. HORN, W. — Kontrastverfahren für Oberflächenprüfungen. Fachbericht für Oberflächentechnik, 5, 127 (1967)

20. KLINGER, H. G. und GABRIEL, E. — Die Erfassung der Oberflächentopographie von Zähnen mit Zahnschliffen mit einer hochauflösenden mechano-elektrischen Meßanordnung. Dtsch. zahnärztl. Z. 32, 236-239 (1978)

21. KRÖNCKE, A. — Perikymatien. Dtsch. zahnärztl. Z. 21, 1397-1401 (1966)

22. KÜNZEL, A. — Diss. 1979 in Vorbereitung Veränderungen durch Anätzung mit Milchsäure an Zahnoberflächen menschlicher Zähne in vitro.

23. LENZ, H. und NEWESELY, H. — Discussions on Maturation and Remineralisation of Emanel. Adv. Fluorine Res. 3, 95 (1965)

24. MEYER, W. — Normale Histologie und Entwicklungsgeschichte der Zähne des Menschen. 2. Auflage Carl Hanser Verlag, München 13-16 (1951)

25. MEIER, Ch. — Eine Methode zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Füllungsmaterialien in Vivo. Diss. Zürich 1977

26. NEWESELY, H. — Zur Noxe durch den Ätzvorgang mit Süuren bei der Schmelzversiegelung. Dtsch. zahnärztl. Z. 30, 508-512 (1975)

27. PICKERILL, H. P. — Verhütung von Zahnkaries und Mundsepsis. Verlag Hermann Meusser (1913)

28. PREISWERK, G. — Lehrbuch und Atlas der Zahnheilkunde. 2. Auflage, J. F. Lehmann, München 68 (1919)

29. PERTHEN, J. — Technische Information. Elektronisches Profilschreibgerät. Begleitheft mit Bedienungsanleitung.

30. POOLE, D. F. G. and JOHNSON, N. W. — The effects of different demineralizing agents on human dental enamel surface studies by scanning electron microscopy. Arch. oral. Biol. 12, 1621-1634 (1967)

31. RETZIUS, A. — Bemerkungen über den inneren Bau der Zähne. Mit besonderer Rücksicht auf den im Zahnknochen vorkommenden Röhrenbau. Arch. Anat. Physiol. u. Wiss. Med. 538, 486-571 (1937)

32. ROCK, W. M. — The effect of etching of human enamel upon bond strength with fissure sealant resin. Arch. oral. Biol. 19, 873-877 (1974)

33. RUDOLPH, Ch. — Untersuchungen von Schmelzlöslichkeitsunterschieden im Bereich von Retziusstreifen durch mechano-elektrische Oberflächenabtastung eines geätzten Zahnschliffes. Med. dent. Diss. Würzburg (1977)

34. SCOTT, D. B. — Microscopic studies of dental tissues II. Optical microscopy of tooth surfaces, Oral. Surg. Path. Med. 5, 638 (1952)

35. SCOTT, D. B. and KAPLAN, H. and WYKOFF, R. W. G. — Replica studies of changes in tooth surface with age. J. Dent. Res. 28, 31 (1949)

36. SILVERSTONE, L. M. — Surface phenomena in dental caries. Nature, 214, 202-204 (1967)

36. SILVERSTONE, L. M. — Surface phenomena in dental caries. Nature, 214, 202-204 (1967)

37. SILVERSTONE, L.M. The histopathology of enamel lesions produced in vitro in teeth previously wxposed to calcifying fluids
Caries Res. 4, 31-48 (1970)

38. SILVERSTONE, L.M. Fissure sealants laboratory studies
Caries Res. 8, 2-16 (1974)

39. SILVERSTONE, L.M. The acid etch technique: In vitro studies with special reference to the enamel surface and the enamel-resin interface.
Proc. Int. Symp. Acid Etch Tech.
North. Central Publishing Co.
St. Paul Minn. USA (1975)

40. VAHL J. and WOSIEWITZ, U. Feinreliefstudien konditionierter Schmelzflächen und ihrer Adhäsiv-Matrizen bei der Schmelzversieglung
Dtsch. zahnärztl. Z. 31, 35 (1976)

41. WOLF, J. Plastische Histologie der Zahngewebe.
Deutsche Zahn-Mund- und Kieferheil-kunde, 7, 265 (1940)

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dipl. Physiker Dr. rer. nat. Dr. med. habil. E. Gabriel für die Überlassung des Themas und für die von ihm allzeit bereitwillig erwiesene wertvolle Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. F. Gehring danke ich für die Übernahme des Referates.

Herrn Prof. Dr. R. Naujoks danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Mein Dank gilt den Mitarbeitern des SFB 92 für ihre stete Hilfsbereitschaft, besonders Herrn Dipl. Physiker Dr. H. G. Klinger.

LEBENSLAUF

Am 9. Mai 1943 wurde ich als zweites Kind des Zahnarztes Dr. Kurt Kulzer und seiner Ehefrau Irmgard geb. Richelt in Swinemünde geboren.

Nach dem Krieg fanden wir eine neue Heimat in Bergen, Kreis Celle. Von 1950 - 1954 besuchte ich die dortige Volksschule und trat dann auf das Gymnasium Christianschule, Hermannsburg über.
1963 wechselte ich auf das Nordseegymnasium Langeoog, wo ich 1966 die Reifeprüfung ablegte.
Danach begann ich das Studium der Zahnmedizin an der Universität Würzburg.
Dort legte ich 1967 die Naturwissenschaftliche und 1969 die Zahnärztliche Vorprüfung ab.
Im August 1972 bestand ich die Zahnärztliche Prüfung.
1973 und 1974 leistete ich meinen Wehrdienst bei der Bundeswehr ab.
Danach arbeitete ich als Assistent in einer Praxis in Bad Pyrmont.
Im Oktober 1977 machte ich mich in Höxter selbständig.

Dissertationsdruck
Schmitt & Meyer

Würzburg Ludwigkai 28a Tel. 7 23 80

Dissertationsdruck
Schmitt & Meyer

Würzburg Ludwigkai 28a Tel. 7 23 80